

## ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ АЛЬТЕРНАТИВНО-ПУЛЬСАЦИОННЫХ МАШИН

В. В. ГОМЗЯКОВ, Ю. Н. КРОНЕБЕРГ, А. С. ЖИБИНОВ

Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники

Особенность машин альтернативно-пульсационного типа [1] состоит в том, что полюсы одной полярности возбуждаются постоянными магнитами, противоположной — преимущественно от обмотки возбуждения, а по осевым магнитопроводам замыкается разность потоков полюсов противоположной полярности. Обычно для увеличения глубины регулирования полюсы, возбуждаемые постоянными магнитами, выполняются с меньшей полюсной дугой. По этим причинам потоки реакции якоря под разноименными полюсами оказываются различными, а сопротивления реакции якоря  $x_{ad}$ ,  $x_{aq}$  определяются их суммарным действием.

Несмотря на то, что из-за сложности продольной цепи использование  $x_{ad}$  в машинах альтернативно-пульсационного типа для расчета рабочих характеристик нецелесообразно [2, 3], иногда знание этого параметра оказывается все-таки необходимым (работа в комплекте с регуляторами, анализы поведения машин в системах из нескольких источников и разных по характеру нагрузок и т. д.). При определении  $x_{ad}$  должна учитываться специфика структуры продольной магнитной цепи машины.

### Продольная ось

Индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси, как известно, определяется выражением [4]

$$x_{ad} = 2mf \frac{w_{\Sigma}^2}{p} \frac{\Phi_{\Sigma ad1}}{F_{ad1}}, \quad (1)$$

где  $f$  — частота;  $p$ ,  $m$ ,  $w_{\Sigma}$  — числа пар полюсов, фаз и эффективных витков;  $\Phi_{\Sigma ad1}$  — результирующий поток первой гармоники от намагничивающей силы (н. с.) реакции якоря с амплитудой  $F_{ad1}$ . Для определения  $\Phi_{\Sigma ad1}$  воспользуемся схемой замещения магнитной цепи (рис. 1), сопротивления которой выражены в относительных единицах при базовом сопротивлении воздушного зазора

$$R_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta k_{\delta}}{\tau l}, \quad (2)$$

где  $\tau$ ,  $l$  — полюсное деление и длина якоря;  
 $\delta$ ,  $k_{\delta}$  — воздушный зазор и коэффициент Картера.



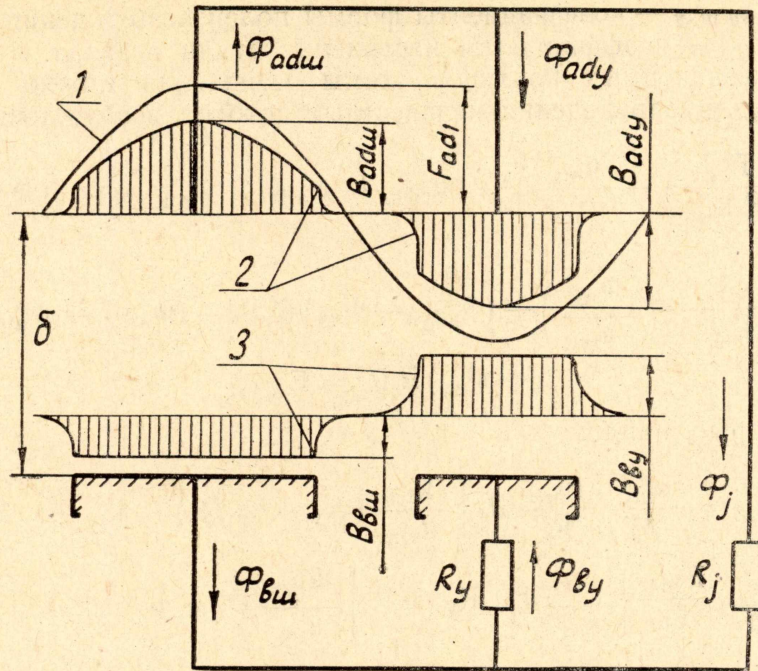


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи по продольной оси и составляющие индукций в воздушном зазоре: 1 — н. с. реакции якоря по продольной оси; 2 — поле реакции якоря; 3 — поле возбуждения;  $R_y$  — сопротивление постоянного магнита с учетом его рассеяния;  $R_j$  — сопротивление осевого магнитопровода

При линейности магнитной цепи можно рассматривать ее конечное состояние как результат наложения от действия двух источников: н. с. реакции якоря, синусоидально распределенной по расточке статора, и н. с. от падений магнитного потенциала на сопротивлениях  $R_y$  и  $R_j$ , причем вторые действуют аналогично н. с. обмотки возбуждения, создавая потоки широких и узких полюсов ( $\Phi_{в ш, у}$ ) и поля воздушного зазора с индукциями по осям полюсов

$$B_{в ш, у} = \frac{\Phi_{в ш, у}}{\alpha_{i ш, у} \cdot \tau l}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{i ш, у}$  — коэффициенты расчетной полюсной дуги [5].

Для индукций ( $B_{ad ш, у}$ ) и потоков первых гармоник ( $\Phi_{1ad ш, у}$ ) реакции якоря, используя коэффициенты поля воздушного зазора [6], получаем

$$B_{ad ш, у} = F_{ad1} \frac{\mu_0}{\delta k_\delta k_{\mu ш, у}}, \quad (4)$$

$$\Phi_{1ad ш, у} = \frac{2}{\pi} \tau l B_{ad ш, у} k_{d ш, у}. \quad (5)$$

Учитывая, что отношение первых гармоник к полным потокам реакции якоря для альтернативно-пульсационных машин имеет вид

$$\frac{\Phi_{1ad ш, у}}{\Phi_{ad ш, у}} = \frac{2}{\pi} \frac{k_{d ш, у}}{k_{f ш, у}}, \quad (6)$$

найдем

$$\Phi_{ad ш, у} = \frac{F_{ad1} k_{f ш, у}}{R_\delta k_{\mu ш, у}}, \quad (7)$$



где  $k_{f_{ш,у}}$ ,  $k_{d_{ш,у}}$  — коэффициенты формы полей возбуждения и реакции якоря;  $k_{\rho_{ш,у}}$  — коэффициенты насыщения стали статора.

Для независимых контуров схемы замещения можно составить уравнения для определения неизвестных потоков возбуждения

$$R_{\delta} k_{\rho_{ш}} \left( \frac{F_{ad1}}{R_{\delta} k_{\rho_{ш}}} - \frac{\Phi_{вш}}{\alpha_{иш}} \right) + (\Phi_{adш} - \Psi_{ady} - \Phi_{вш} + \Phi_{vy}) R_j R_{\delta} = F_{ad1}, \quad (8)$$

$$R_{\delta} k_{\rho_{у}} \left( \frac{F_{ad1}}{R_{\delta} k_{\rho_{у}}} - \frac{\Phi_{vy}}{\alpha_{iy}} \right) + (\Phi_{ady} - \Phi_{vy}) R_y R_{\delta} - (\Phi_{adш} - \Phi_{вш} - \Phi_{ady} + \Phi_{vy}) R_j R_{\delta} = F_{ad1}, \quad (9)$$

решив которые, найдем

$$\Phi_{вш} = \frac{\alpha_{иш}}{M} \frac{F_{ad1}}{R_{\delta}} R_j \left[ \frac{k_{fш}}{k_{\rho_{ш}}} (k_{\rho_{у}} + \alpha_{iy} R_y) - k_{fy} \right], \quad (10)$$

$$\Phi_{vy} = \frac{\alpha_{iy}}{M} \frac{F_{ad1}}{R_{\delta}} \left\{ \frac{k_{fy}}{k_{\rho_{у}}} k_{\rho_{ш}} R_y + R_j \left[ \frac{k_{fy}}{k_{\rho_{у}}} (k_{\rho_{ш}} + \alpha_{иш} R_y) - k_{fш} \right] \right\}, \quad (11)$$

где

$$M = k_{\rho_{ш}} (k_{\rho_{у}} + \alpha_{iy} R_y) + R_j [\alpha_{iy} k_{\rho_{ш}} + \alpha_{иш} (k_{\rho_{у}} + \alpha_{iy} R_y)], \quad (12)$$

причем коэффициенты  $\alpha_{иш,у}$ , входящие в (10),—(12), должны определяться с учетом соотношения индукций ( $\beta$ ) под широкими и узкими полюсами [5]

$$\beta = \frac{\alpha_{iy}}{\alpha_{иш}} \frac{\Phi_{вш}}{\Phi_{vy}}. \quad (13)$$

При известных  $\Phi_{вш,у}$  можно найти первые гармоники результирующих потоков широких и узких полюсов

$$\Phi_{иш,у} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{F_{ad1}}{R_{\delta}} \frac{k_{dш,у}}{k_{\rho_{ш,у}}} - \Phi_{вш,у} \frac{k_{fш,у}}{\alpha_{иш,у}} \right), \quad (14)$$

а подставив их сумму в (1), получим

$$x_{ad} = 2mf \frac{\mu_0 D l}{\delta k_{\delta}} \frac{w_{\delta}^2}{p^2} \frac{C}{M}, \quad (15)$$

где

$$C = M \left( \frac{k_{dш}}{k_{\rho_{ш}}} + \frac{k_{dy}}{k_{\rho_{у}}} \right) - R_y \left[ k_{fy}^2 \frac{k_{\rho_{ш}}}{k_{\rho_{у}}} + R_j \left( \alpha_{iy} \frac{k_{fш}^2}{k_{\rho_{ш}}} + \alpha_{иш} \frac{k_{fy}^2}{k_{\rho_{у}}} \right) \right] - R_j \frac{k_{\rho_{ш}}}{k_{\rho_{у}}} \left( k_{fy} - k_{fш} \frac{k_{\rho_{у}}}{k_{\rho_{ш}}} \right)^2. \quad (16)$$

#### Поперечная ось

Первая гармоника потока поперечной реакции якоря также может быть получена суммированием первых гармоник потоков узких и широких полюсов, причем при отсутствии полюсных башмаков потоки реакции якоря под узкими полюсами (из постоянных магнитов) существенно снижаются, что приводит к уменьшению  $x_{aq}$ . Для учета этого факта воспользуемся эмпирической формулой для  $x_{aq}$  магнитоэлектрических машин [7]



$$x_{aqm} = x_{aqz} \frac{1}{1 + \frac{b_m}{2\delta\rho}}, \quad (17)$$

где  $b_m$ ,  $\rho$  — ширина магнита и проницаемость возврата. Тогда для индуктивного сопротивления по поперечной оси альтернативно-пульсационной машины имеем

$$x_{aq} = 2mf \frac{\mu_0 D l}{k_c \delta} \frac{w_\varepsilon^2}{p^2} \left( \frac{k_{qш}}{k_{\mu ш}} + \frac{k_{qy}}{k_{\mu y}} \frac{1}{1 + \frac{b_m}{2\delta\rho}} \right), \quad (18)$$

откуда при большой проницаемости возврата ( $\rho \sim \infty$ ) получим сопротивление  $x_{aq}$  для машины с полюсными башмаками.

Расчеты, проведенные по (15), показывают, что индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси интенсивно уменьшается с ростом сопротивлений магнита и осевого магнитопровода, снижаясь при больших значениях последних до 20—30% от сопротивления базовой машины электромагнитного возбуждения с полюсной дугой  $\alpha = 0,5$  ( $\alpha_y + \alpha_{ш}$ ), тогда как неравенство полюсных дуг ( $\alpha_y/\alpha_{ш} = 0,5 \div 1$ ) мало влияет на величину  $x_{ad}$ .

Индуктивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси машины с полюсными наконечниками увеличивается при уменьшении  $\alpha_y/\alpha_{ш}$  примерно до 1,1 сопротивления базовой машины; при отсутствии башмаков  $x_{aq}$  растет более интенсивно ( $\sim 0,6 x_{aqб}$  при  $\alpha_y/\alpha_{ш} = 1$  и  $\sim 0,9 x_{aqб}$  при  $\alpha_y/\alpha_{ш} = 0,5$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Кронеберг, В. Б. Гомзяков, А. С. Жибинов. Конструкции альтернативно-пульсационных машин. В кн.: «Проектирование устройств электропитания и электропривода». Т. 2. «Электромеханические устройства и элементы технологии». М., «Энергия», 1973, с. 22—27.
2. Ю. Н. Кронеберг, В. Г. Мосин, А. С. Жибинов. К расчету электрических машин со сложными продольными цепями. В кн.: «Устройства электропитания и электропривода малой мощности». Т. 2. «Электрические машины и аппараты». М. «Энергия», 1970, с. 30—33.
3. Ю. Н. Кронеберг, В. Г. Мосин, А. С. Жибинов. Расчет внешних характеристик синхронных машин со сложными продольными цепями. В кн.: «Электротехническая аппаратура». Т. 2. «Электрические машины». М., «Энергия», 1971, с. 8—14.
4. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Ч. 2. М.-Л., «Энергия», 1965, с. 704.
5. Ю. Н. Кронеберг, А. С. Жибинов, В. Б. Гомзяков. Коэффициенты расчетной полюсной дуги альтернативно-пульсационных машин с магнитномягкими полюсными наконечниками. Известия ТПИ, т. 228 (в печати).
6. А. С. Жибинов, Ю. Н. Кронеберг, В. Б. Гомзяков. Коэффициенты формы поля воздушного зазора альтернативно-пульсационных машин с магнитномягкими полюсными наконечниками. Настоящий сборник.
7. В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов. Электрические машины с постоянными магнитами. М.-Л., «Энергия», 1964, с. 480.